外来红树植物拉关木对乡土种桐花树和正红树的化感作用研究

杨珊，刘强*，王炳宇，王旭萍，Juma GUL

（热带岛屿生态学教育部重点实验室，海南师范大学生命科学学院，海口 571158）

摘要：为了探究外来红树植物拉关木对乡土红树植物的化感作用，本研究观察了不同浓度（0.1、0.3、0.5 g·mL^{-1}）的拉关木根、叶水浸提液对乡土红树植物桐花树和正红树的胚轴（种子）萌发、幼苗生长及叶片抗氧化酶活性的影响。结果显示：拉关木水浸提液对桐花树种子的成苗率、萌发指数和根长均存在抑制作用，其中，对根长的抑制作用随水浸提液浓度的提高而增强。根水浸提液对桐花树幼苗的根长、苗高、生物量等生长指标的影响总体上均表现为低浓度促进，高浓度抑制。拉关木水浸提液对正红树胚轴的萌发率、萌发指数、生长指标均表现为促进作用，且根 0.1、0.3 g·mL^{-1} 处理组的芽长以及根、叶 0.1、0.3 g·mL^{-1} 处理组的生物量显著大于对照组。拉关木水浸提液对正红树幼苗的生物量也表现为促进作用。抗性生理方面，随着拉关木水浸提液浓度的升高，桐花树和正红树幼苗 SOD 活性降低，正红树幼苗 POD 活性在根 0.3 g·mL^{-1} 和叶 0.1 g·mL^{-1} 处理组显著高于对照。研究结果表明，不同乡土植物对拉关木化感作用的敏感性不同，拉关木水浸提液抑制了桐花树的生长，而对正红树的生长则表现出一定程度的促进作用。

关键词：化感作用，拉关木，水浸提液，萌发，幼苗生长

Allelopathic effects of exotic mangrove plant *Laguncularia racemosa* on native species *Aegiceras corniculatum* and *Rhizophora apiculata*

YANG Shan，LIU Qiang*，WANG Bingyu，WANG Xunping，JUMA GUL

（*Minister of Education Key Laboratory for Ecology of Tropical Island, College of Life Sciences, Hainan Normal University,* Haikou 571158, China）

Abstract： To explore the allelopathic effect of exotic mangrove species *Laguncularia racemosa* on the native species, it was observed the effects of three concentration levels（0.1、0.3、0.5 g·mL^{-1}）of aqueous extracts from *L. racemosa* roots and leaves on the germination, seedling growth and leaf antioxidase activity of the two native mangrove species *Aegiceras corniculatum* and *Rhizophora apiculata*. The results showed that the aqueous extracts of *Laguncularia racemosa* had inhibitory effects on seedling rate of seeds, germination index and root length of *Aegiceras corniculatum*, in which the inhibitory effects on root length increased with the

基金项目：国家自然科学基金资助项目（31960281）；UNDP-GEF 项目"海南东寨港外来树种种植区植被调查及监测方案"；海南省普通高等学校研究生创新科研课题（Hys2018-235）[Supported by the National Natural Science Foundation of China (31960281)；UNDP-GEF Program "Vegetation Survey and Monitoring Program of Exotic Tree Species Planting Area in hainan dongzhai port"；Innovative Research Program for Postgraduate Students in Hainan Province（Hys2018-235）]。

作者简介：杨珊（1994-），女（苗族），湖北利川人，硕士研究生，主要从事恢复生态学研究，（E-mail）1667807929@qq.com。

*__通信作者：__刘强，博士，教授，主要从事恢复生态学和入侵生态学研究，（Email）hnsylq@163.com。

concentration of aqueous extracts increasing. In addition, effects of root aqueous extracts on the growth indexes of root length, seedling height and biomass of *A. corniculatum* seedlings were positive in lower concentration and negative in higher concentration. Meanwhile, the aqueous extracts of *Laguncularia racemosa* had promoting effects on the germination rate, germination index and growth index of *Rhizophora apiculata* hypocotyls. The bud lengths in the groups treated by the root extracts of 0.1 and 0.3 g·mL^{-1} and the biomass in the groups treated by the root and leaf extracts of 0.1 and 0.3 g·mL^{-1} were significantly larger than those in control. The aqueous extracts of *Laguncularia racemosa* had promoting effects on the biomass of the *Rhizophora apiculata* seedling as well. In stress physiology, the SOD activities of *Aegiceras corniculatum* and *Rhizophora apiculata* seedlings decreased with the concentration of aqueous extracts increasing, while and the POD activities of *R. apiculata* seedlisngs in treatment group with 0.3 g·mL^{-1} root aqueous extract and in the group with 0.1 g·mL^{-1} leaf aqueous extract were significantly higher than those in control. The results indicate that the sensitivities of the two native species to the allelopathy of *Laguncularia racemosa* are different. The aqueous extracts have inhibitory effect on the growth of *Aegiceras corniculatum* but promotional effect on the growth of *Rhizophora apiculata* to some extent.

Key words: allelopathy，*Laguncularia racemosa*，aqueous extract，germination，seedling growth

外来植物可以通过竞争、抢占生态位、分泌化学物质等方式影响本地植物的生长，减少当地的物种丰富度，从而对新生境生态系统结构和功能产生影响（Lake & Leishman，2004；Fine，2002；类延宝等，2010）。化感作用是植物向环境中释放化学物质从而对其他植物产生的正面或负面的影响，它是外来植物成功定植的一个重要的武器（Orr et al.，2005；Cipollini et al.，2012；邓文红等，2019）。很多研究证明外来植物能通过化感作用影响本地植物的生长，如在美国、智利、印度和葡萄牙的外来植物蓝桉（*Eucalyptus globulus*）凋落物浸提液能够抑制林下植物根系的生长（Becerra et al.，2017）；来自于热带和亚热带的外来植物望江南（*Senna occidentalis*）根、茎提取物能抑制巴西的本地植物金风铃（*Tabebuia chrysotricha*）和白花风铃木（*Tabebuia roseoalba*）种子萌发和植物生长等（Da & Vieira，2019）；欧洲的本地植物峨参（*Anthriscus sylvestris*）对来自北美洲的外来入侵植物鲁冰花（*Lupinus polyphyllus*）没有化感耐受性（Lyytinen & Lindström，2019）。通过对更多的外来植物与乡土植物之间的化感作用的研究有助于深入认识种间关系和种间相互作用，是揭示生物入侵机制的重要途径之一。

拉关木（*Laguncularia racemosa*）是使君子科的一种真红树植物，1999 年由墨西哥拉巴斯市引入我国海南东寨港红树林自然保护区（廖宝文等，2006；钟才荣等，2011）。由于其快速的生长特性以及较强的环境耐受性等特点，早期作为我国红树林恢复的先锋树种进行引种种植（向敏等，2016；陈远合等，2010）。但近年来野外调查发现，拉关木在其引种种植区已逐渐形成了单优群落，林下很少有乡土红树植物能够正常的生长。化感作用是入侵物种在其新范围内成功入侵的常见解释，拉关木的化感作用可能是该现象形成的原因之一，而目前拉关木对乡土红树植物化感作用的研究还比较少。本文通过研究外来红树植物拉关木根、叶水浸提液对乡土红树植物桐花树（*Aegiceras corniculatum*）种子和正红树（*Rhizophora apiculata*）胚轴的萌发以及对它们幼苗生长的影响，探究拉关木对乡土红树植物可能存在的化感作用。目前在海南有的拉关木林正在进行疏伐修枝改造，并试图引入乡土红树植物，以期恢复乡土红树植物群落，本研究可以为此类外来种拉关木红树林向乡土红树植物群落恢复提供参考。

1、材料与方法

1. 1 试验材料

供体植物拉关木新鲜的根和叶采自于海南东寨港外来树种种植区，受体植物桐花树种子采集于海南东寨港自然保护区，正红树胚轴收集于海南三亚铁炉港红树林保护区。

1. 2 试验方法

1.2.1 水浸提液的制备

水浸提液的制备参照李玫等（2004）的方法，采集拉关木新鲜的根、叶，带回实验室洗净并放在阴凉处自然风干、切碎（<2 cm）、称量，分别放入塑料桶中并加入一定比例的蒸馏水制成质量浓度为 0.5 g·mL^{-1} 的水浸提液，期间每隔 12 h 搅拌 10 min，3 d 天后用 4 层无菌纱布过滤得到母液。参照拉关木对木榄（*Bruguiera gymnorhiza*）和海桑（*Sonneratia caseolaris*）的化感作用实验（王秀丽等，2017； Zhang et al.，2018），用蒸馏水将母液稀释成 0.1、0.3、0.5 g·mL^{-1} 的处理液，保存于 4℃的冰箱中。每次浇灌前在室温下放置一段时间，避免温度太低对苗木造成伤害。

1.2.2 胚轴、种子萌发和幼苗生长试验

参照红树植物化感作用的相关研究方法（王秀丽等，2017； Zhang et al.，2018），在每个花盆中种植 8 支大小一致的胚轴或种子，每 3 盆为一组，盆内机制按沙土∶红土∶营养土为 3:3:1 配置。每盆每 2 d 浇不同浓度的拉关木根、叶水浸提液 50 mL，对照组加入蒸馏水。每天记录胚轴或种子的萌发情况，桐花树以长出胚芽，正红树以顶芽出第一对叶为萌发标准，连续 5 d 无出芽或展叶为萌发结束。实验结束时测量每株植物的芽长、根长及生物量，并计算萌发指标。萌发率（%）=胚轴（种子）的萌发数/供试胚轴（种子）数×100%；萌发指数 GI=∑Gt/DT，式中 Gt 为第 t 天时的萌发数，DT 为萌发天数，GI 用于衡量胚轴（种子）的萌发速率（李苇洁等，2017）。

幼苗生长试验中，处理组设置与胚轴萌发试验一致。选择定植 1 个月的生长一致的幼苗，每盆种植 3 株，每盆每 5 d 浇不同浓度的拉关木根、叶水浸提液 150 mL，对照组加入蒸馏水，每个月均对幼苗的株高、基径、冠幅等生长指标进行测定，试验持续时间为 6 个月，试验结束时选取生长一致的幼苗成熟叶片，按苏州科铭生物技术有限公司的超氧化物歧化酶（SOD）和抗坏血酸过氧化酶（POD）测定试剂盒操作手册对桐花树和正红树幼苗叶的 SOD、POD 的活性进行测定。最后将幼苗收获，测定其根长以及生物量。

1.2.3 数据处理与分析

化感效应指数参照 Williamson 和 Richardson（1988）的方法，即 $RI=T/C-1$，式中 C 为对照值，T 为处理值，RI 表示化感作用效应大小，$RI>0$ 为促进效应，$RI<0$ 为抑制效应，其绝对值大小反映化感作用的强弱。综合效应指数（SE）为同一受体植物所测的生长指标的 RI 算术平均值，是对受体植物的化感效应进行综合评价的指标（董红云等，2010）。所有数据均采用 Excel 和 SPSS17.0 进行处理分析，并用 origin9.0 进行作图。

2、结果与分析

2.1 拉关木水浸提液对桐花树种子和正红树胚轴萌发的影响

由表 1 可知，拉关木根、叶水浸提液对受体植物桐花树种子和正红树胚轴萌发均具有一定的影响。拉关木根、叶水浸提液对桐花树的萌发率、萌发指数以及芽长均表现为一定程度的抑制作用，随着水浸提液浓度的增加，抑制作用逐渐减弱。对根长的影响也呈现出抑制作用，但抑制作用随着浓度的增加而增强，与对照相比，拉关木根 0.1-0.5 g·mL^{-1} 处理组和叶 0.1-0.5 g·mL^{-1} 处理组根长分别降低了 32.86%、49.16%、48.52%和 23.86%、45.68%、42.99%，各处理组根长均显著小于对照组（$P<0.05$），说明拉关木水浸提液对桐花树种子的萌发有抑

制作用。

拉关木根、叶水浸提液对正红树胚轴的萌发率、萌发指数、根长、芽长和生物量的影响均表现为促进作用，随着水浸提液浓度的升高，根、叶水浸提液对正红树胚轴的促进作用表现为先增加后减小的趋势。在拉关木根、叶水浸提液 0.1-0.5 g·mL^{-1} 处理下，正红树生物量分别比对照增加了 31.09%、54.40%、21.56%和 41.73%、47.23%、4.44%。正红树芽长和根长在根水浸提液处理下能显著大于对照组（P<0.05）。说明拉关木水浸提液对正红树胚轴的萌发存在一定程度的促进作用，且根水浸提液的促进作用强于叶水浸提液。

表 1 拉关木水浸提液对受体植物胚轴、种子萌发的影响

Table 1 Effects of aqueous extract of *Laguncularia racemosa* on the hypocotyls and seeds germination of recipient plants

树种 Species	处理 Treatment（g·mL^{-1}）		萌发率 Germination percentage（%）	萌发指数 Germination index	芽长 Bud length（cm）	根长 Root length（cm）	生物量 Biomass（g）
桐花树 *Aegiceras corniculatum*	CK	0	45.83±11.79 a	0.15±0.04 a	9.63±2.05 a	11.27±3.23 a	0.59±0.27 a
	根水浸提液 Root aqueous extract	0.1	25.00±0.00 a	0.07±0.01 b	9.39±2.11 a	7.57±2.66 bc	1.14±0.89 a
		0.3	41.67±11.79 a	0.10±0.03 ab	9.57±2.47 a	5.73±2.17 c	0.60±0.31 a
		0.5	45.83±11.79 a	0.12±0.03 ab	9.98±3.25 a	5.80±2.83 c	0.64±0.47 a
	叶水浸提液 Leaf aqueous extract	0.1	29.17±11.79 a	0.08±0.03 b	8.61±1.21 a	8.58±2.85 b	0.89±0.48 a
		0.3	33.33±5.89 a	0.08±0.02 b	8.81±1.34 a	6.12±2.26 c	0.63±0.37 a
		0.5	45.83±11.79 a	0.12±0.04 ab	8.82±1.77 a	6.42±2.17 c	0.46±0.01 a
正红树 *Rhizophora apiculata*	CK	0	87.50±10.21 a	0.15±0.02 a	7.87±2.95 b	6.33±1.57 b	1.02±0.32 c
	根水浸提液 Root aqueous extract	0.1	95.83±5.89 a	0.16±0.02 a	12.18±4.56 a	7.23±1.59 b	1.34±0.42 b
		0.3	100.00±0.00 a	0.20±0.01 a	12.43±3.98 a	8.76±0.92 a	1.58±0.47 a
		0.5	91.67±5.89 a	0.17±0.01 a	9.48±3.41 b	9.37±1.81 a	1.24±0.42 bc
	叶水浸提液 Leaf aqueous extract	0.1	100.00±0.00 a	0.19±0.01 a	10.63±3.23 ab	6.54±1.43 b	1.45±0.34 ab
		0.3	100.00±0.00 a	0.20±0.01 a	10.36±4.07 ab	7.51±1.36 b	1.51±0.47 ab
		0.5	91.67±5.89 a	0.16±0.04 a	8.21±5.66 b	7.48±1.21 b	1.08±0.39 c

注：表中数值为平均值±标准差，同一列中不同字母表示各处理间差异显著(P<0.05)

Note：The values in the table are mean±standard deviation, and the different letters in the same column indicate significant differences between treatments (P<0.05).

比较拉关木根、叶水浸提液对桐花树种子和正红树胚轴萌发的化感效应，结果如表 2 所示，从 SE1 值可看出，不同浓度的拉关木根、叶水浸提液对桐花树种子的萌发均表现为抑制作用。从 SE2 值可知，根水浸提液的综合效应指数为-0.099，其绝对值小于叶水浸提液的综合效应指数（-0.146），说明拉关木叶水浸提液对桐花树种子萌发的抑制作用强于根水

浸提液。正红树各生长指标的 RI 值均为正值，说明拉关木水浸提液对胚轴萌发有促进作用，从 SE1 值可知，拉关木根、叶水浸提液对正红树胚轴萌发促进作用强弱顺序为：0.3 g·mL^{-1}>0.1 g·mL^{-1}>0.5 g·mL^{-1}。拉关木根水浸提液的综合效应（SE2）指数为 0.210，大于叶水浸提液的综合效应指数（0.152），说明拉关木根水浸提液对正红树胚轴萌发的促进作用强于叶水浸提液。

表 2 拉关木水浸提液对桐花树种子和正红树胚轴萌发的化感效应比较

Table2 Comparison of allelopathic effects of *Laguncularia racemosa* aqueous extract on germination of *Aegiceras corniculatum* seeds and *Rhizophora apiculata* hypocotyls

树种 Species	处理 Treatment（g·mL^{-1}）		萌发率 Germination（%）	萌发指数 Germination index	芽长 Bud length（cm）	根长 Root length（cm）	生物量 Biomass（g）	SE1	SE2
桐花树 *Aegiceras corniculatum*（RI）	根水浸提液 Root aqueous extract	0	0	0	0	0	0	0	-0.099
		0.1	-0.455	-0.556	-0.026	-0.329	0.929	-0.087	
		0.3	-0.091	-0.356	-0.006	-0.492	0.017	-0.186	
		0.5	0.000	-0.240	0.035	-0.485	0.074	-0.123	
	叶水浸提液 Leaf aqueous extract	0	0	0	0	0	0	0	-0.146
		0.1	-0.364	-0.487	-0.106	-0.239	0.499	-0.139	
		0.3	-0.273	-0.484	-0.086	-0.457	0.061	-0.248	
		0.5	0.000	-0.246	-0.085	-0.430	-0.229	-0.198	
正红树 *Rhizophora apiculata*（RI）	根水浸提液 Root aqueous extract	0	0	0	0	0	0	0	0.210
		0.1	0.095	0.078	0.548	0.141	0.311	0.235	
		0.3	0.143	0.310	0.579	0.383	0.544	0.392	
		0.5	0.048	0.113	0.205	0.480	0.216	0.212	
	叶水浸提液 Leaf aqueous extract	0	0	0	0	0	0	0	0.152
		0.1	0.143	0.283	0.351	0.032	0.417	0.245	
		0.3	0.143	0.307	0.317	0.186	0.472	0.285	
		0.5	0.048	0.065	0.044	0.182	0.044	0.077	

注：SE1 为同一器官同一浓度 RI 的算数平均值，SE2 为同一器官不同浓度的 SE1 算数平均值。

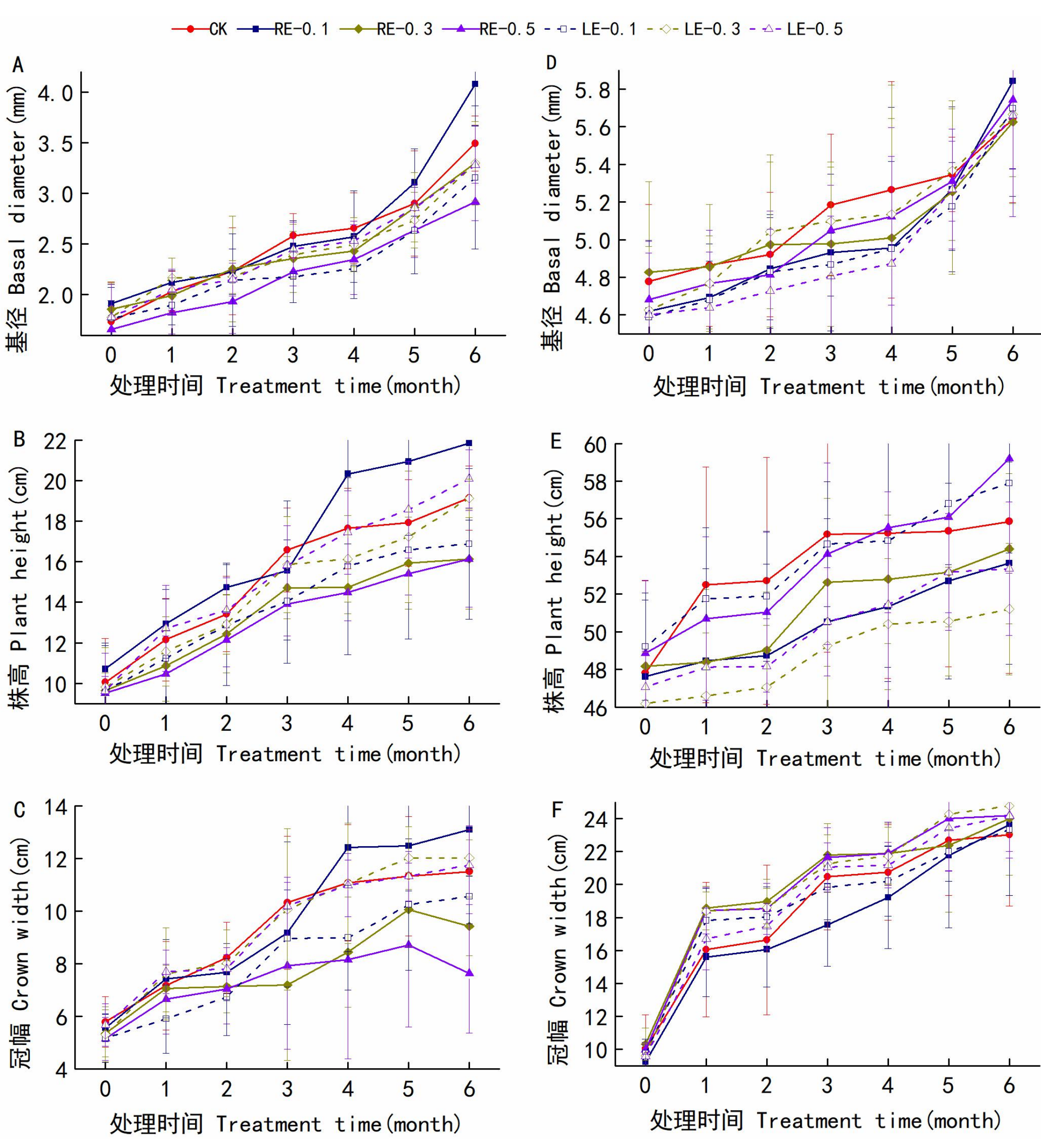
Note：SE1 is the average value of the same concentration of RI in the same organ, and SE2 is the average value of SE1 in different concentrations of the same organ.

2.2 拉关木水浸提液对两种本地红树植物幼苗生长的影响

拉关木不同器官不同浓度的水浸提液对桐花树幼苗生长存在差异。与对照相比，在处理前 3 个月时，拉关木根水浸提液对桐花树基径存在抑制作用，浓度越高抑制作用越强，在处理 4-6 个月时，存在“低促高抑”的现象（图 1 A）；对株高和冠幅影响规律整体上表现为低浓度促进，高浓度抑制（图 1 B、C）。处理 6 个月后，对照组和根 0.1 g·mL^{-1} 处理组的基径、株高和冠幅均显著大于根 0.3 g·mL^{-1} 和根 0.5 g·mL^{-1} 处理组（P<0.05），且根 0.1 g·mL^{-1} 处理组的基径显著大于对照（P<0.05）（表 3）。总体来看，拉关木根水浸提液对桐花树幼苗的

生长表现为“低促高抑”。拉关木叶水浸提液对桐花树幼苗的生长没有显著的影响。说明供体植物不同部位所含有的影响受体植物生长的化学成分可能有所不同。

拉关木水浸提液对正红树幼苗生长的影响如图 1（D、E、F）所示，与对照相比，正红树幼苗基径在处理前 4 个月时存在抑制作用，随着叶水浸提液浓度的升高，抑制作用先减弱后又逐渐增强，且叶 0.5 g·mL^{-1} 处理组能显著抑制其生长（P<0.05）（表 3）。在处理 6 个月后，各组处理对正红树基径有一定程度的促进作用。拉关木根、叶水浸提液在中高浓度处理下对正红树冠幅有促进作用，在低浓度时存在抑制作用（图 1 F）。从总体上看，在处理前期，拉关木根、叶水浸提液对正红树幼苗生长有一定程度的抑制作用，后期又逐渐转变为促进作用，说明随着正红树幼苗的生长能逐渐适应拉关木的化感作用。



①CK、RE-0.1、RE-0.3、RE-0.5、LE-0.1、LE-0.3、LE-0.5 分别表示对照组、根水浸提液 0.1 g·mL^{-1}、根水浸提液 0.3 g·mL^{-1}、根水浸提液 0.5 g·mL^{-1}、叶水浸提液 0.1 g·mL^{-1}、叶水浸提液 0.3 g·mL^{-1}、叶水浸提液 0.5 g·mL^{-1} 处理组；② A、B、C 分别表示桐花树幼苗的基径、株高、冠幅，D、E、F 分别表示正红树幼苗的基径、株高、冠幅。

①CK, RE-0.1, RE-0.3, RE-0.5, LE-0.1, LE-0.3 and LE-0.5 respectively represent the control group, root aqueous extract 0.1 g·mL^{-1}, root aqueous extract 0.3 g·mL^{-1}, root aqueous extract 0.5 g·mL^{-1}, leaf aqueous extract 0.1

g·mL[-1], leaf aqueous extract 0.3 g·mL[-1], leaf aqueous extract 0.5 g·mL[-1] treatment group; ② A, B and C indicate the basal diameter, plant height and crown width of *Aegiceras corniculatum* seedlings respectively, while D, E and F indicate the basal diameter, plant height and crown width of *Rhizophora apiculata* seedlings respectively.

图 1 拉关木水浸提液作用下桐花树（左）和正红树（右）幼苗生长的动态变化

Fig.1 Dynamic changes of seedling growth of *Aegiceras corniculatum* (left) and *Rhizophora apiculata* (right) under the action of *Laguncularia racemosa* aqueous extract

表 3 桐花树和正红树幼苗生长指标各处理间差异显著性分析

Table 3 Significant analysis results of the differences between the growth indexes of *Aegiceras corniculatum* and *Rhizophora apiculata* seedling

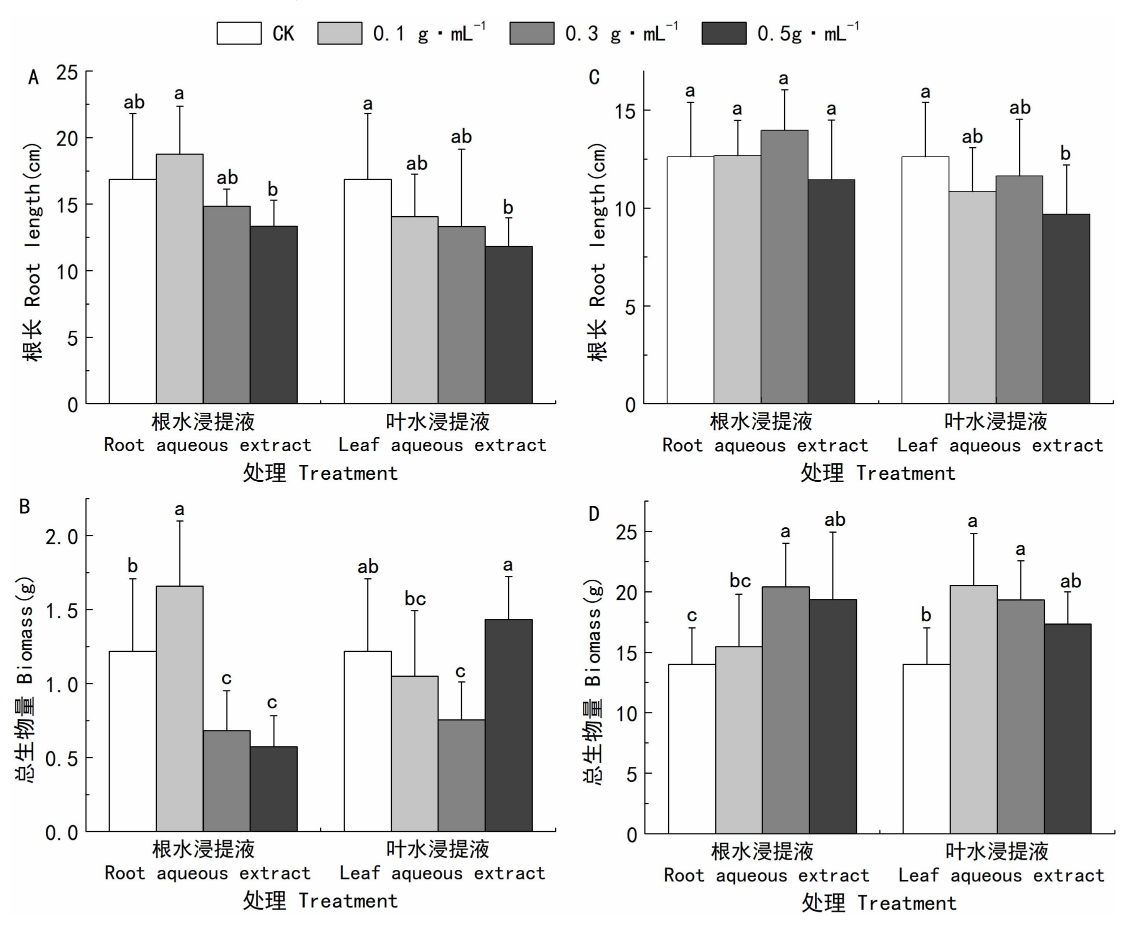
树种 Species	处理时间（月） Treatment time (month)	基径 Basal diameter	株高 Plant height	冠幅 Crown width
桐花树 *Aegiceras corniculatum*	1	CK-$R_{0.5}$ 0.028 $R_{0.1}$-$R_{0.5}$ 0.003 $L_{0.1}$-$L_{0.3}$ 0.006	$R_{0.1}$-$R_{0.3}$ 0.050 $R_{0.1}$-$R_{0.5}$ 0.020	$L_{0.1}$-$L_{0.3}$ 0.015 $L_{0.1}$-$L_{0.5}$ 0.011
	2	-	$R_{0.1}$-$R_{0.5}$ 0.025	CK-$L_{0.1}$ 0.016 $L_{0.1}$-$L_{0.3}$ 0.037
	3	CK-$R_{0.5}$ 0.006 CK-$L_{0.1}$ 0.002 $L_{0.1}$-$L_{0.5}$ 0.035	-	$R_{0.1}$-$R_{0.3}$ 0.015
	4	CK-$R_{0.5}$ 0.026 CK-$L_{0.1}$ 0.006	CK-$R_{0.5}$ 0.049	CK-$R_{0.5}$ 0.032 $R_{0.1}$-$R_{0.3}$ 0.008 $R_{0.1}$-$R_{0.5}$ 0.002
	5	-	-	-
	6	CK-$R_{0.1}$ 0.013 CK-$R_{0.5}$ 0.014 $R_{0.1}$-$R_{0.3}$ 0.002 $R_{0.1}$-$R_{0.5}$ 0.000	CK-$R_{0.3}$ 0.047 CK-$R_{0.5}$ 0.033 $R_{0.1}$-$R_{0.3}$ 0.000 $R_{0.1}$-$R_{0.5}$ 0.000 $L_{0.1}$-$L_{0.5}$ 0.020	CK-$R_{0.3}$ 0.024 CK-$R_{0.5}$ 0.000 $R_{0.1}$-$R_{0.3}$ 0.000 $R_{0.1}$-$R_{0.5}$ 0.000
正红树 *Rhizophora apiculata*	1	-	-	-
	2	-	-	-
	3	CK-$L_{0.5}$ 0.033	CK-$L_{0.3}$ 0.014 $L_{0.1}$-$L_{0.3}$ 0.024	CK-$R_{0.1}$ 0.011 $R_{0.1}$-$R_{0.3}$ 0.000 $R_{0.1}$-$R_{0.5}$ 0.000
	4	CK-$R_{0.1}$ 0.039 CK-$L_{0.1}$ 0.041 CK-$L_{0.5}$ 0.010	-	$R_{0.1}$-$R_{0.3}$ 0.019 $R_{0.1}$-$R_{0.5}$ 0.020
	5	-	$L_{0.1}$-$L_{0.3}$ 0.032	-
	6	-	-	-

注：①表中数值为差异显著性分析的概率值 *P* 值；②CK 为对照组，$R_{0.1}$、$R_{0.3}$、$R_{0.5}$ 分别为根水浸提液 0.1、0.3、0.5 g·mL[-1] 处理组，$L_{0.1}$、$L_{0.3}$、$L_{0.5}$ 分别为叶水浸提液 0.1、0.3、0.5 g·mL[-1] 处理组。

Note: ①The values in the table are the probability *P* values of the difference significance analysis; ②CK is the control group, $R_{0.1}$, $R_{0.3}$, $R_{0.5}$ are the root aqueous extracts 0.1, 0.3, 0.5 g·mL^{-1} treatment group respectively, $L_{0.1}$, $L_{0.3}$, $L_{0.5}$ are leaf aqueous extracts 0.1, 0.3, 0.5 g·mL^{-1} treatment group respectively.

拉关木根、叶水浸提液对桐花树和正红树幼苗根长的影响如图 2 所示。从图 2A 可知，桐花树根 0.1、0.3、0.5 g·mL^{-1} 处理组的根长分别比对照增加了 11.24%、减少了 11.87%和减少了 20.85%，拉关木根水浸提液对桐花树幼苗根长存在低浓度促进，高浓度抑制的影响规律；叶水浸提液 0.1、0.3、0.5 g·mL^{-1} 处理组的根长分别比对照减少了 16.47%、21%和 29.84%，叶水浸提液对桐花树根长整体表现为抑制作用，且浓度越高抑制作用越强。从图 2B 可以看出，拉关木根水浸提液对桐花树幼苗生物量的影响总体表现为"低促高抑"。根 0.1 g·mL^{-1}、0.3 g·mL^{-1}、0.5 g·mL^{-1} 处理组生物量比对照分别高 36.07%、低 44.03%、低 52.96%。叶 0.1 g·mL^{-1} 和 0.3 g·mL^{-1} 处理组对桐花树生物量有一定程度的抑制作用。

拉关木对正红树幼苗根长的影响如图 2C 所示，拉关木叶水浸提液对正红树幼苗根长有一定程度的抑制作用，0.5 g·mL^{-1} 处理组根长相对对照降低了 23.33%，且与对照间差异显著（$P<0.05$）。拉关木各器官水浸提液对正红树幼苗生物量影响均表现为促进作用（图 2D）。叶 0.1 g·mL^{-1}、0.3 g·mL^{-1}、0.5 g·mL^{-1} 处理组生物量分别比对照高 46.76%、38.19%、23.91%，随着叶水浸提液浓度的升高，促进作用逐渐减弱。不同处理下桐花树和正红树幼苗根长和生物量变化不同，说明拉关木不同器官中对影响受体植物生长的成分和浓度可能有所不同，不同受体植物对拉关木水浸提液的耐受程度也可能不同。



①A、B 分别表示桐花树幼苗的根长、总生物量，C、D 分别表示正红树幼苗的根长、总生物量；②CK 表示对照组，0.1、0.3、0.5 表示用拉关木根、叶水浸提液 0.1 g·mL^{-1}、0.3 g·mL^{-1}、0.5 g·mL^{-1} 的处理组。下同。

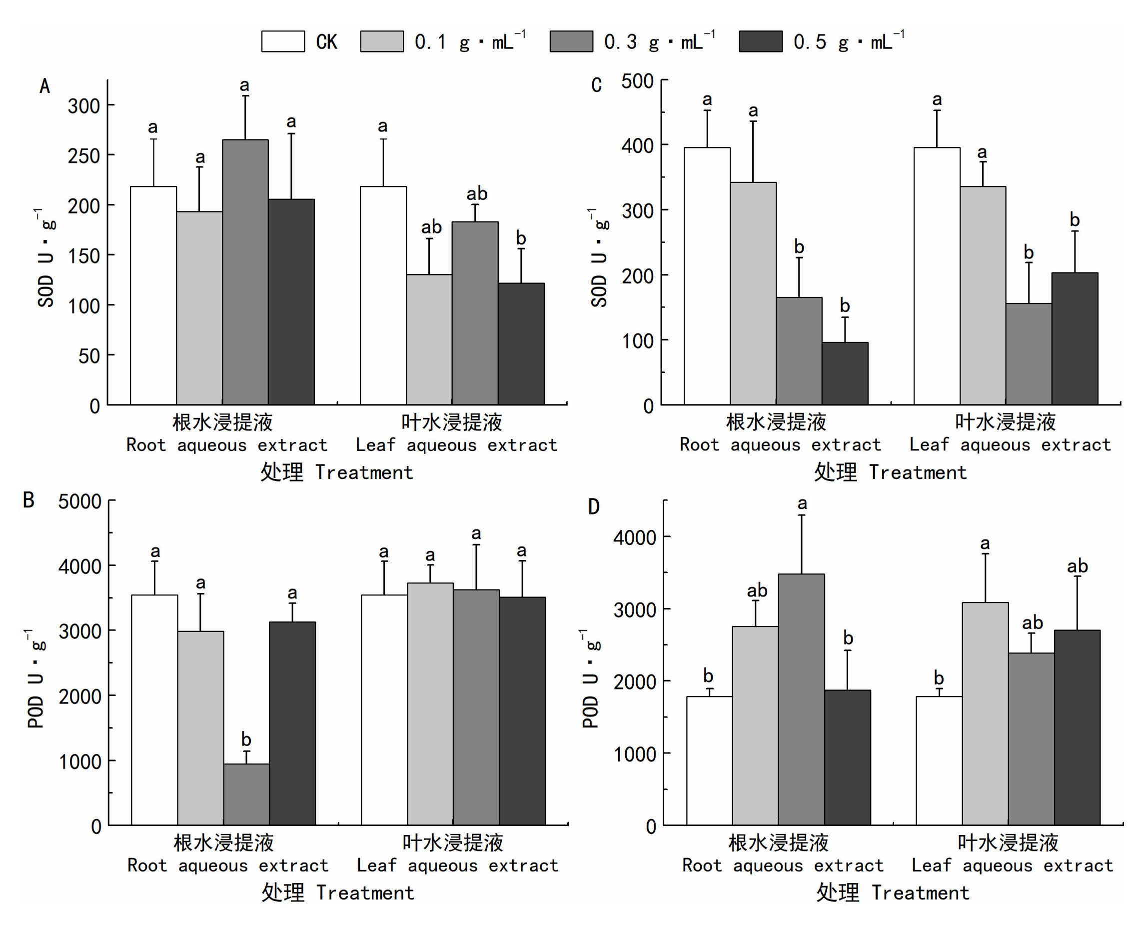
①A and B indicate the root length and biomass of *Aegiceras corniculatum* seedlings respectively, while C and D indicate the root length and biomass of the seedlings of *Rhizophora apiculata* respectively. ②CK represents the control group, while 0.1, 0.3 and 0.5 represent the treatment groups of *Laguncularia racemosa* root and leaf aqueous extraction of 0.1 g·mL^{-1}, 0.3 g·mL^{-1} and 0.5 g·mL^{-1}. The same below.

图 2 拉关木水浸提液对桐花树（左）和正红树（右）幼苗根长和生物量的影响

Fig.2 Effects of *Laguncularia racemosa* aqueous extract on root length and biomass of *Aegiceras corniculatum* (left) and *Rhizophora apiculata* (right) seedlings

2.3 拉关木水浸提液对两种本地红树植物幼苗体内酶活性的影响

拉关木水浸提液对桐花树幼苗叶片的 SOD、POD 活性的影响如图 3（A、B）所示。随着拉关木根、叶水浸提液浓度的升高，SOD 活性呈先升高后降低的趋势，但均低于对照组。拉关木根水浸提液处理组幼苗的 POD 活性均低于对照组。拉关木水浸提液对正红树幼苗酶活性影响如图 3（C、D）所示。正红树幼苗 SOD 活性随着拉关木根、叶水浸提液浓度的升高而逐渐降低。根 0.3、0.5 g·mL^{-1} 和叶 0.3、0.5 g·mL^{-1} 处理组 SOD 活性相对对照分别降低了 58.20%、75.68%和 60.62%、48.67%，与对照间差异显著（P<0.05）。POD 活性随着水浸提液浓度的升高呈先增加后降低的变化趋势。



A、B 分别表示桐花树幼苗的 SOD、POD，C、D 分别表示正红树幼苗的 SOD、POD。

A and B indicate SOD and POD of *Aegiceras corniculatum* seedlings respectively, while C and D indicate SOD and POD of *Rhizophora apiculata* seedlings respectively.

图 3 拉关木水浸提液下桐花树（左）和正红树（右）幼苗抗氧化酶活力

Fig.3 Antioxidant enzyme activities of *Aegiceras corniculatum* (left) and *Rhizophora apiculata* (right) seedlings under *Laguncularia racemosa* aqueous extract

3 结论与讨论

对受体植物进行种子萌发和幼苗生长的生物测定，是评价供体植物毒素物质活性的主要方法，也是评估逆境胁迫程度和植物抗性能力的重要依据（曾任森，1999；冯剑等，2016）。植物化感作用的强弱与化感物质的来源、种类、含量和受体植物的敏感程度等有关（Duke ，2003）。

植物种子萌发率被认为是许多生态过程的关键决定因素，萌发指数也是化感作用中反映植物毒素的主要指标之一（Dias et al.，2017）。在化感作用对种子萌发影响方面，有研究表明，拉关木的枝、叶、果水浸提液对海桑种子的萌发存在显著的抑制作用，浓度越高，抑制作用越强（Zhang et al.，2018）。李玫等（2002）对外来树种无瓣海桑（*Sonneratia apetala*）化感作用研究表明，无瓣海桑各器官水浸提液对海桑种子萌发均起抑制作用。朱宏伟等（2012）用老鼠簕（*Acanthus ilicifolius*）地上和地下部分处理无瓣海桑种子，结果表明老鼠簕地上和地下部分的化感作用均能抑制无瓣海桑种子的萌发。本研究中，拉关木水浸提液对桐花树种子萌发有抑制作用。可能是因为水浸提液中的化感物质与受体植物之间相互作用，抑制了受体植物细胞分裂、生长、改变了细胞膜的通透性，从而抑制了种子的萌发。但拉关木水浸提液对正红树胚轴萌发有促进作用，与前面的研究结果不同，可能是因为不同受体植物的生物学特性不同，对同一供体植物化感响应机制也不相同。有研究表明，植物可以将次生代谢物质运输到特定的细胞器或产生耐受蛋白来抵御次生代谢产物对自身的伤害（Shitan，2016）。正红树可能启动了自身的耐受机制，抵御拉关木水浸提液的伤害。而拉关木水浸提液具有多种化学成分，可能其中某些化学物质对正红树这个种的生长有促进作用。

在化感作用对幼苗生长影响方面，本研究中拉关木根水浸提液对桐花树幼苗生长表现为低浓度促进，高浓度抑制的特点。这与王秀丽等（2017）研究拉关木化感作用对木榄幼苗生长结果一致。拉关木叶水浸提液对桐花树幼苗根长的影响表现为抑制作用，浓度越高，抑制作用越强，与 LI 等（2012）研究的木麻黄（*Casuarina equisetifolia* ）水浸提液对青皮（*Vatica mangachapoi*）幼苗根长存在抑制作用的结果一致。说明桐花树幼苗对拉关木化感作用有一定的耐受性。正红树在拉关木不同浓度处理组下的生物量均大于对照组，说明拉关木水浸提液能促进正红树幼苗的生长。

在化感作用的抗性生理方面，化感作用可视作一种胁迫因素。在环境胁迫下，植物体内活性氧的增加激活化学防御信号，启动抗氧化酶系统。当植物体内活性氧自由基大量积累时，会导致细胞内膜脂过氧化反应，影响植物的正常生长（Zhang et al.，2017；王秀丽等，2017）。在本研究中，桐花树和正红树幼苗 SOD 活性均低于对照组，高浓度处理组与对照间存在显著性差异。这与张权等（2016）研究的山核桃（*Carya illinoensis*）根系水浸提液能降低小麦（*Triticum aestivum*）和大豆（*Glycine max*）幼苗 SOD 含量的试验结果一致。在水浸提液浓度较高时，受体植物体内产生的自由基无法被有效的清除，幼苗生长受到了严重的影响。随着拉关木水浸提液浓度的提高，正红树幼苗 POD 活性先升高，然后逐渐下降，但均高于对照组，这与田学军等（2016）用南美蟛蜞菊（*Wedelia trilobata*）对豌豆（*Pisum sativum*）的化感作用的研究结果一致。因此表明正红树对拉关木的化感作用产生了防御应答。

综合而言，外来红树拉关木的化感作用对已研究的几种乡土红树树种既有显示抑制作用的，也有显示促进作用的，因种而异。本研究发现拉关木的化感作用对正红树的生长有促进效应，但野外调查发现拉关木林下很少有乡土红树植物能够正常生长，可能是因为拉关木林的郁闭度较高，林下光照度低影响了乡土红树植物的正常生长。也可能是因为拉关木大量的抢夺资源，限制了乡土植物对资源的利用。资源竞争被认为是植物群落动态的关键因素（Da & Vieira，2019）。由于本研究只是限于在盆栽实验中研究拉关木对乡土红树的果实、胚轴、

幼苗期的化感作用，在野外生境中快速生长的拉关木对乡土红树的影响远不仅限于化感作用。外来红树植物对乡土红树植物群落的影响既有不同乡土种对其化感作用的差异响应，又有资源竞争等其他因素复杂交织作用。对于如何进行拉关木林向乡土红树植物群落的转化，还应考虑多重因素，未来还需开展更多的研究。

参考文献

BECERRA PI, CATFORD JA, INDERJIT, et al.，2017. Inhibitory effects of *Eucalyptus globulus* on understorey plant growth and species richness are greater in non-native regions[J]. Global Ecol Biogeogr, 27(1): 68-76.

CHEN YH, XIAO ZX, PENG JH, et al.， 2010. Investigation on freeze injury of *Sonneratia caseolaris*, *S. apetala* & *Laguncularia racemosa* in eastern of Guangdong Province[J]. Prot Forest Sci Technol, (04): 15-17. [陈远合，肖泽鑫，彭剑华，等，2010. 粤东海桑、无瓣海桑、拉关木冻害调查报告[J]. 防护林科技，(04)：15-17.]

CIPOLLINI K, TITUS K, WAGNER C, 2012. Allelopathic effects of invasive species (*Alliaria petiolata*, *Lonicera maackii, Ranunculus ficaria*) in the Midwestern United States[J]. Allelopathy J, 29: 63-76.

DA SILVA ÍF,VIEIRA EA, 2019. Phytotoxic potential of *Senna occidentalis* (L.) Link extracts on seed germination and oxidative stress of Ipê seedlings[J]. Plant biol, 21(4): 770-779.

DENG WH, ZHAO XR, ZHANG JQ, et al.，2019. Allelopathic effects of aqueous extracts from *Artemisia ordosica* on four associated herbaceous plants[J]. Acta Ecol Sin, 39(15): 5670-5678. [邓文红，赵欣蕊，张俊琦，等，2019. 沙蒿(*Artemisia ordosica*)水浸提液对 4 种伴生草本植物的化感作用[J]. 生态学报，39(15)：5670-5678.]

DIAS MP, NOZARI RM, SANTARÉM ER, 2017. Herbicidal activity of natural compounds from *Baccharis* spp. on the germination and seedling growth of *Lactuca sativa* and *Bidens pilosa*[J]. Allelopathy J, 42: 21-36.

DONG HY, LI Y, WANG Q, et al.，2010. Bioassay of allelopathy of water extracts from alien invasive plants *Crassocephalum crepidioides* and *Galinsoga parviflora*[J]. J Plant Resour Environ, 19(02): 48-53+91.[董红云，李亚，汪庆，等，2010. 外来入侵植物牛膝菊和野茼蒿水浸提液化感作用的生物测定[J]. 植物资源与环境学报，19(02)：48-53+91.]

DUKE ISO, 2003. Ecophysiological aspects of allelopathy[J]. Planta, 217(4): 529-539.

FENG J, LIU Q, WANG J, et al.， 2016. Effects of leachates from *Casuarina equisetifolia* on growth and physiological and biochemical characteristics of *Terminalia catappa* seedlings[J]. Guihaia, 36(03): 308-314+260.[冯剑，刘强，王瑾，等，2016. 木麻黄浸提液对榄仁树幼苗生长及生理生化的影响 [J]. 广西植物，36(03)：308-314+260.]

FINE PVA, 2002. The invasibility of tropical forests by exotic plants[J]. J Trop Ecol, 18(5): 687-705.

LAKE JC, LEISHMAN MR, 2004. Invasion success of exotic plants in natural ecosystems: The role of disturbance, plant attributes and freedom from herbivores[J]. Biol Conserv, 117(2): 215-226.

LEI YB, XIAO HF, FENG YL, 2010. Impacts of alien plant invasions on biodiversity and evolutionary responses of native species[J]. Biodivers Sci, 18(06): 622-630.[类延宝，肖海峰，冯玉龙，2010. 外来植物入侵对生物多样性的影响及本地生物的进化响应[J]. 生物多

样性，18(06)：622-630.]

LI L, ZHANG Y, DING Y, et al.， 2012. Effect of *Casuarina equisetifolia* leachates on photosynthesis of *Vatica mangachapoi* Blanco seedlings[J]. Allelopathy J, 29(2): 231-240.

LI M, LIAO BW, ZHENG SF, et al.，2002. Primary studies on allelopathy of *Sonneratia apetala*[J]. Ecol Sci, 21(3): 197-200.[李玫，廖宝文，郑松发，等，2002. 外来种无瓣海桑化感作用研究初报[J]. 生态科学，21(3)：197-200.]

LI M, LIAO BW, ZHENG SF, et al.， 2004. Allelopathic effects of *Sonneratia apetala* on native mangrove plants[J]. Forest Res, 17(05): 641-645.[李玫，廖宝文，郑松发，等，2004. 无瓣海桑对乡土红树植物的化感作用[J]. 林业科学研究，17(05)：641-645.]

LI WJ, LUO KY, WU D, et al.， 2017. Response of native plant species *Sophora davidii* to allelopathy of *Eupatorium adenophorum*[J]. Acta Ecol Sin, 37(16): 5361-5367.[李苇洁，罗开源，吴迪，等，2017. 乡土植物白刺花对紫茎泽兰化感作用的响应[J]. 生态学报，37(16)：5361-5367.]

LIAO BW, ZHENG SF, CHEN YJ, et al.，2006. Preliminary report on introduction of several alien mangrove plants in Dongzhai Harbour of Hainan Province[J]. J Cent South For Univ, 26(3): 63-67.[廖宝文，郑松发，陈玉军，等，2006. 海南东寨港几种国外红树植物引种初报[J]. 中南林学院学报，26(3)：63-67.]

LYYTINEN A, LINDSTRÖM L, 2019. Responses of a native plant species from invaded and uninvaded areas to allelopathic effects of an invader[J]. Ecol Evol, 9(10): 6116-6123.

ORR SP, RUDGERS JA, CLAY K, 2005. Invasive plants can inhibit native tree seedlings: testing potential allelopathic mechanisms[J]. Plant Ecol, 181(2): 153-165.

SHITAN N, 2016. Secondary metabolites in plants: transport and self-tolerance mechanisms[J]. Biosci Biotechnol Biochem, 80(7): 1283-1293.

TIAN XJ, SHEN DR, SHEN YM, et al.，2016. On effect of *Wedelia trilobata* on genotoxicity and antioxidant enzyme activity of *Pisum sativum*[J]. J Southwest China Normal Univ(Nat Sci), 41(03): 72-75.[田学军，沈登荣，沈云玫，等，2016. 南美蟛蜞菊对豌豆的遗传毒性及抗氧化酶活性的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版)，41(03)：72-75.]

WANG XL, LU CY, ZHOU L, et al.， 2017. Allelopathic effect of exotic mangrove plant *Laguncularia racemosa* on *Bruguiera gymnoehiza* [J]. J Xiamen Univ(Nat Sci), 56(03): 339-345.[王秀丽，卢昌义，周亮，等，2017. 外来红树植物拉关木对木榄的化感作用[J]. 厦门大学学报(自然科学版)，56(03)：339-345.]

WILLIAMSON GB, RICHARDSON D, 1988. Bioassays for allelopathy: measuring treatment responses with independent controls[J]. J Chem Ecol, 14(1): 181-187.

XIANG M, LIU Q, LI NY, et al.， 2016. Comparison of ionic equilibrium and photosynthesis in introduced *Laguncularia racemosa* and two native mangrove species in China[J]. Guihaia, 36(04): 387-396.[向敏，刘强，李妮亚，等，2016. 引进红树拉关木和两种乡土红树离子平衡及光合作用的比较研究[J]. 广西植物，36(04)：387-396.]

ZENG RS, 1999. Review on bioassay methods for allelopathy research[J]. Chin J Appl Ecol, 10(1): 123-126.[曾任森，1999. 化感作用研究中的生物测定方法综述[J]. 应用生态学报，10(1)：123-126.]

ZHANG Q, YAO XH, TENG JH, et al.， 2016. Effects of water extraction from roots of *Carya illinoensis* on seed germination and seeding growth of two crops[J]. Bull Bot Res, 36(2): 204-210.[张权，姚小华，滕建华，等，2016. 薄壳山核桃根系水浸提液对 2 种作物种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 植物研究，36(2): 204-210.]

ZHANG Y, LIANG FP, YANG Y, et al.， 2018. Allelopathic effects of leachates from two alienmangrove species, *Sonneratia apetala* and *Laguncularia racemosa* on seed germination, seedling growth and antioxidative activity of native mangrove species *Sonneratia caseolaris*[J]. Allelopathy J, 44(1): 137-148.

ZHONG CR, LI SC, YANG YC, et al.， 2011. Analysis of the introduction effect of a mangrove species *Laguncularia racemosa*[J]. J Fujian For Sci Technol, 38(3): 96-99.[钟才荣，李诗川，杨宇晨，等，2011. 红树植物拉关木的引种效果调查研究[J]. 福建林业科技，38(3)：96-99.]

ZHU HW, ZHENG SF, PENG HW, et al.， 2012. Allelopathic effects of *Acanthus ilicifolius* aqueous extracts on *Sonneratia apetala*[J]. J Cent S Univ For Technol, 32(6): 34-36.[朱宏伟，郑松发，彭辉武，等，2012. 老鼠簕对无瓣海桑化感作用的研究[J]. 中南林业科技大学学报，32(6)：34-36.]